



УДК 621.313.3

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ: УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ДУГИ В ДУГОВОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ

REVIEW OF RESEARCH ON THE THEME: MANAGEMENT OF THE ARC POSITION IN ARC VACUUM FURNACES

Фаттяхетдинов Кирилл Андреевич, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: faul721@gmail.com, Тел.: +7(912)646-56-19

Фризен Василий Эдуардович, д-р. техн. наук, доцент, зав. каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vefriзен@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-41-87

Fattyakhmetdinov Kirill Andreevich, Master student, Department «Electrical engineering and electrotechnical systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: faul721@gmail.com. Ph.: +7(912)646-56-19

Frizen Vasily Eduardovich, Doctor Sc., Dozent., head of the department «Electrical engineering and electrotechnical systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vefriзен@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-41-87

Аннотация: В данной работе проведен обзор исследований по теме: управление положением дуги в дуговой вакуумной печи. Рассмотрены существующие теории, различные методы расчета с экспериментальными подтверждениями.

Abstract: In this paper, a review of research on the topic: control of the position of the arc in an arc vacuum furnace is conducted. Existing theories, various calculation methods with experimental confirmations are considered.

Ключевые слова: управление положением дуги; неоднородное магнитное поле.

Key words: arc control; inhomogeneous magnetic field.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности во многих технологических процессах достаточно широко используется электрическая дуга. При этом, свободно горящая дуга может хаотически перемещаться между электродами. Это перемещение достаточно сложно предсказать, как и ее характеристики. Например, при плавке металла в вакуумно-дуговых печах может происходить вынос дуги на стенки тигля или ванны, что может привести к снижению качества выплавляемого металла или к аварии. Существующие способы управления положением дуги используют управление параметрами электродугового источника, что не приносит желаемого результата, либо же они уменьшают вредные последствия неуправляемого взаимодействия дуги с окружающими конструктивными элементами. На сегодня существует необходимость управления местоположением канала дуги в промежутке

между электродами или между электродом и металлом в печи.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРОВОДОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЕЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В статье [1] приводится исследование, доказывающее эффективность использования пондеромоторного взаимодействия токопроводов с электрической дугой для стабилизации ее положения. Рассматривалась задача пондеромоторного воздействия проводника с током, расположенного между дном тигля и торцом полубесконечного проводящего цилиндра (Рис.1.).

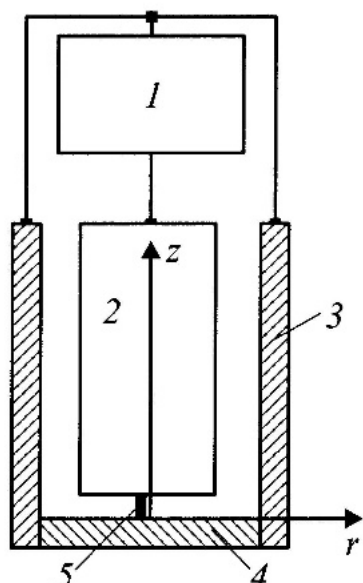


Рис. 1. Схема коаксиального расположения электродов: 1 – источник тока, 2 – цилиндрический электрод, 3 – стенка тигля, 4 – дно тигля, 5 – канал дугового разряда

В этой геометрии токопроводами служили цилиндрический электрод, дно тигля с проводимостью σ_w . Дуга также рассматривалась в виде бесконечного тонкого линейного тока, направленного перпендикулярно торцу электрода и дну тигля. Полагалось, что перераспределение тока в электроде происходит в бесконечно тонком слое его торца. Распределением тока по толщине стенок и дна тигля пренебрегалось, т.е. токи полагались поверхностными.

В выражении для расчета радиальной силы F_m , действующей на единицу длины проводника с током, протекающим между дном тигля и торцом электрода, важно соотношение проводимостей между дном и стенкой тигля. Можно выделить следующие три предельных случая, определяющих поведение электрической дуги в геометрии магнитного поля коаксиальных электродов: а) $\sigma_w \ll \sigma_b$ – случай малой проводимости стенки тигля; б) $\sigma_w = \sigma_b$ – случай равной проводимости дна стенки и тигля; в) $\sigma_b \ll \sigma_w$ – случай малой проводимости дна тигля.

Результаты расчетов показывают, что первые два случая качественно не отличаются от задачи с аксиальными электродами. Для случая малой проводимости дна тигля по сравнению со стенкой ($\sigma_b \ll \sigma_w$) установлено, что при $R_c/R_w \geq 0.9$ (R_c – радиус электрода, R_w – внутренний радиус тигля) существует область $0 \leq R \leq 0.75R_w$, в которой сила F_m , действующая на дугу, направлена к оси системы, т.е. равновесное положение является устойчивым (рис.2). Случай малой проводимости стенок на практике реализуется, например, при плавке титана в медных тиглях.

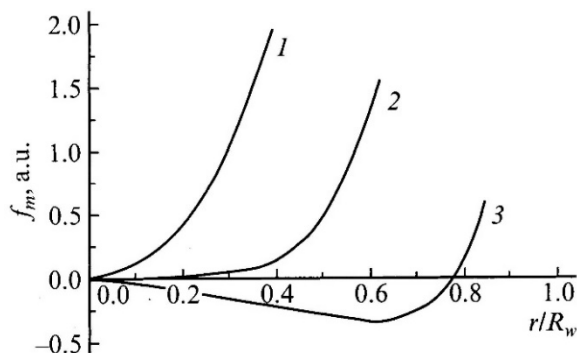


Рис. 2. Зависимость силы f_m , действующей на единицу длины проводника с током между коаксиальными электродами в радиальном направлении, от расстояния до оси электродов ($f_m = 10^7 \cdot F_m \cdot Re/I^2$, где I – ток разряда А, Re – в м, F_m – в Н/м). Случай малой проводимости дна тигля по сравнению со стенкой ($\sigma_b \ll \sigma_w$). Re/R_w : 1 – 0,5, 2 – 0,7, 3 – 0,9

Экспериментальная проверка результатов расчета по стабилизации положения канала дугового разряда осуществлялась с помощью проплавления алюминиевых фольг, плотно совмещаемых с торцом верхнего электрода. Фольги, проплавленные при условии одинаковой (рис.3, а) и малой проводимостей (рис. 3, б) дна тигля, подтверждают результаты проведенного расчета. Как и ожидалось, в первом случае получены следы хаотического перемещения канала дугового разряда по торцу электрода и выходом на периферию электрода. Другая картина наблюдалась во втором случае. Видно, что канал дугового разряда не выходит на периферию электродов и его местоположение было ограничено областью, максимальный радиус которой меньше радиуса верхнего электрода. [1].

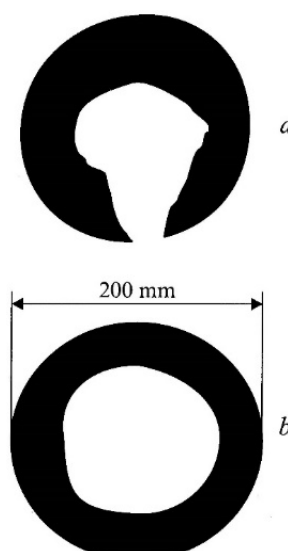


Рис.3. Фольга, проплавленная в условиях, когда проводимости дна и стенки равны ($\sigma_w = \sigma_b$) (а) и когда проводимости стенки много меньше проводимости дна ($\sigma_w \ll \sigma_b$) (б)

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ КАНАЛА ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Электрическая дуга является плазменным проводником, и естественно для управления ею использовать свойства плазмы, в частности ее диамагнетизм. Однако, при изучении поведения плазменных проводников в пространственно неоднородных магнитных полях авторы столкнулись с парадоксальным с точки зрения диамагнетизма плазмы явлением. Плазменный столб дуги постоянного тока в зависимости от направления тока в нем может устойчиво гореть как в области минимального, так и в области максимального магнитного поля. Причем условие намагниченности, необходимое для диамагнитного возбуждения, может не выполняться.

Такое поведение дугового разряда удалось объяснить при учете эффекта Холла, проявляющегося в появлении дополнительного тока, перпендикулярного приложенным электрическому и магнитному полям. Взаимодействие тока Холла с внешним магнитным полем и определяет поведение дугового разряда. Был выполнен эксперимент, который подтвердил теоретическое предсказание.

Результаты работы [2] позволяют предположить способы управления электрической дугой постоянного тока с помощью неоднородных электрических полей. С этой целью в теоретической части работы было рассмотрено взаимодействие дуги постоянного тока с магнитным полем кольцевого тока. Определены и исследованы на устойчивость те местоположения дуги, где силы, действующие на нее в радиальном по отношению к кольцу направлении, равны нулю. В экспериментальной части представлены результаты лабораторной и опытно-промышленной проверки предлагаемого способа, т.е. управления местоположением дуги в разрядном промежутке с помощью короткой электромагнитной катушки.

В ходе эксперимента были получены следующие картины следов электрической дуги постоянного тока на торце катода в зависимости от наличия и расположения катушки. (рис.4). На рис. 4, а приведен след дуги без внешнего магнитного поля. Видно, что дуга перемещается хаотически. На рис. 4, б приведен след дуги при расположении электромагнитной катушки с током под анодом. Как и ожидалось, полученное круглое пятно, подтверждающее соосное с электромагнитной катушкой горение дуги в минимуме магнитного поля. На рис. 4, в приведен след дуги при расположении электромагнитной катушки с током под катодом. Получен также предсказанный результат существования кольцевой области устойчивого положения дугового разряда в максимуме магнитного поля.

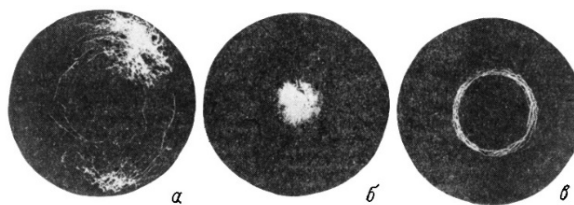


Рис. 4. След электрической дуги постоянного тока на торце катода: а – без магнитного поля электромагнитной катушки, б – при расположении электромагнитной катушки у анода, в – при расположении электромагнитной катушки у катода

В работе [3] подробно описана математическая модель поведения горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля в ванне дуговой печи при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду. Посредством компьютерного моделирования установлено, что с увеличением количества витков токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда наиболее рациональным является токоподвод из 2–3 витков. Для токоподвода в форме винтовой линии число витков должно быть не более 5–6, так как с их дальнейшим увеличением величина магнитного поля возрастает незначительно. Установлено, что наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме пространственной спирали Архимеда, так как при прочих равных условиях при компактной форме она обеспечивает более высокие значения напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве. Рассмотренные конструкции токоподводов различной формы, позволяют управлять изменением величины напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны, а значит, управлять положением дуги (рис.5).

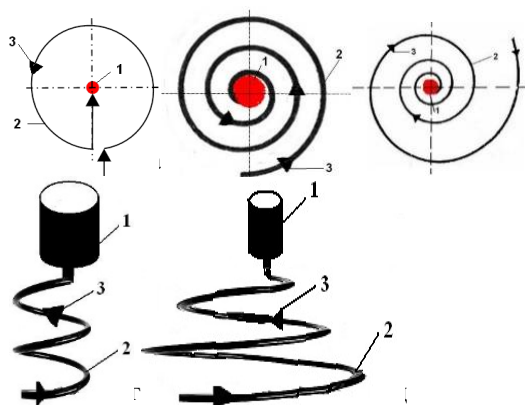


Рис.5. Токоподводы к подовому электроду в виде: а – одного витка, б – плоской спирали, в – плоской спирали Архимеда; 1 – подовый электрод, 2 – жесткая токоподводящая шина, 3 – направление тока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье были рассмотрены известные способы воздействия на дуговой разряд в вакуумной дуговой печи. Использование пандеромоторного взаимодействия магнитного поля и дуги для стабилизации ее положения сейчас является достаточно интересной задачей и нуждается в новых исследованиях и экспериментах. Но и по результатам текущих исследований уже можно предполагать и проектировать такие конструкции ванны или тигля печи, в которых силы, вызванные пандеромоторным взаимодействием, способны стабилизировать положение дуги. Управление положением канала дуги неоднородным магнитным полем также является перспективным методом решения поставленной задачи. Рассмотренные исследования показывают, что при создании в дуговой вакуумной печи неоднородного магнитного поля с определенными характеристиками, положение дуги становится стабильным. Существуют решения, позволяющие создать такое поле. Дальнейшим направлением

моей работы станет расчет с моделирование такой системы, которая своим магнитным полем обеспечивала бы стабильное положение дугового разряда в ванне или тигле дуговой вакуумной печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В.Воронин, А.А.Семенов «Управление положением канала дугового разряда в вакуумно-дуговых установках» Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 12. С. 98-100.
2. А.В.Воронин, А.И.Русаков, А.А. Семенов «Взаимодействие электрической дуги постоянного тока с неоднородным магнитным полем» Журнал технической физики ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 4. С. 20-30
3. Ячиков, И.М. Поведение магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду/И.М. Ячиков, И.В. Портнова//Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2015. -№ 1. -С. 76-81.